

両耳性うなりに関する実験的研究

吉 井 和 夫

(1) 緒 言

周波数が若干異なる2つの純音が両耳に分離して導かれ聴取されるとき生ずる知覚現象を両耳性うなりと呼ぶ。両耳性うなりについての研究は古く Dove (1839) Stewart (1917) に始まるが当時は音叉を利用する実験であったので、単なる知覚現象の解明に留まった。両耳性うなりを他覚的うなり、自覚的うなりと区分して説明したのは Lane (1925) である。片耳性うなりや、反対耳への経頭蓋交叉伝導に基づく他覚的両耳うなりが、いずれも音波の物理学的干渉から起るのに対し、本当の両耳性うなりと云える自覚的両耳うなり（以下単に両耳性うなりと呼ぶ）は中枢神経機構における、積分・統合・相関など神経過程に基いて生ずるものと考えられる。これについては末梢内耳を相関入力器に、脳幹を相関器と仮定して交叉相関過程 (cross-correlation) を考えるもの (Lehnhardt 1961) 斉射干渉 (Volley interference) の神経メカニズムに基因し、特に上オリーブ核に注目するもの (Groen 1961) さらに上オリーブ核双極細胞の両極にはそれぞれ左右の聴神経求心性繊維が来ていることを指摘するもの (勝木1967) などがある。さて両耳性うなりの知覚現象として音の変移 (binaural shift Lane 1925) 音の波動 (loudness fluctuation) (Lane 1925, Weber 1949) また音のあらさ (roughness) (Rutschmann 1965) などがあげられ、また二音の分離 (separation) をいうものもある。これら両耳性うなりは、一音あるいは二音が閾値にある場合にも (Tobias 1963), あるいは一音が閾値上に他音が閾値下 (0~20 dB) にある場合にも聴取されるという (Lehnhardt 1961, Groen 1964)。

また両耳性うなりと周波数の関係については、一般に 1000Hz までの低い周波数がよく聴取うるとされている。すなわち 400Hz を最良とするもの (Lickdier, Webster Heldlun など 1950) 400~600Hz を最良とするが、なお 100~2000Hz の間で聴取が可能であるとするもの (Tobias 1963), 800~900Hz を最良とし、

より高い周波数では聴感が低くなり、1500Hz になると不能とするもの (Groen 1964) などがある。また特に音量波動については、振巾変調音の連続比較の場合、150Hz や 300Hz にくらべ 600Hz では整合に要する振巾変調%, がさらに少なくなることが要求されるという。 (Rutschmann and Rubinstein 1965)。すなわち両耳性うなり聴取には 1000Hz 以下の周波数がよいとする説が多いが、1000Hz を越える高い周波数については諸説に著しい相違がある。

本論文は両耳性うなりの音の変移、音の波動、あらさの3点について Active tuning 方式により 500Hz, 750Hz, 1000Hz さらに高い 2000Hz, 4000Hz についても追求した。また音のうなりと弁別閾値に関する実験的研究 (吉井1973) と同じく常時音楽的訓練を受けているグループと一般普通人グループに別けて実験成績を比較検討したものである。

(2) 検査方法

1) 測定装置

図1のブロックダイアグラムがこの実験のための測定装置である。Oscillator-A および B からはそれぞれ正弦波が発生され増巾後、ヘッドホンにより両耳において別個に聴取される。Oscillator からの出力はそれぞれ Oscilloscope および Frequency counter に入る。Oscilloscope の VERT-IN および HOR-IN に入力させる結果 Oscillator-A および B の周波数が同じか、その差が僅かであると円形のリサージュがブラウン管上にあらわれ、両耳聴うなりの聴取との間に次のような関係がある。

うなりの種類	ブラウン管上のリサージュ
両耳性変移 binaural shift	円形がゆっくりちぢんだりまるくなったりする
音量波動 loudness fluctuation	円形の動きがやや速い
あらさ roughness	円形がはげしくのびちみする

また左右二音が別個の音として聴えるときはリサージュはしま模様となる。これを分離 (separation) と

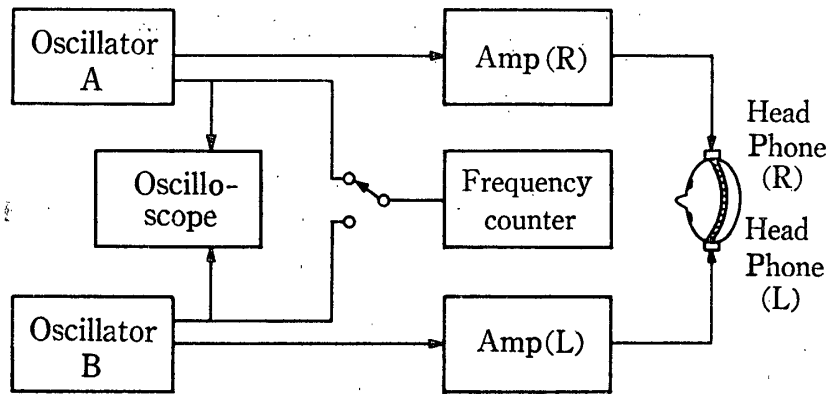


図1 ブロックダイアグラム

Oscillator A, B. 菊水 RC 417型 (微調付)
 Amp (Stereo Amp) Victor MCA 103型
 Frequency counter TOA FC 303型
 Head phone Pioneer SE 20A

月 日 男 女 才 氏名

ゆっくりした波 (うなり) が左の耳から右の耳へうつるような気がする。					
音が大きくなったり, 小さくなったりするよううなりがきこえる。					
前 (まえ) のうなりがはやくきこえる。					
	500	750	1.000	2.000	3.000
4f					

注 あいずをされてから, はっきりときこえたら○ よくわからないと×をつけなさい。

図2 子供用質問用紙

して両耳性うなりの一種とする説もあるがうなりといえるか疑問であると考え, 検査項目から除外した。

2) 検査実施方法

まず Oscillator-A, B を作動させ 500Hz の純音を両耳に別べつに与える。この際ヘッドホン左側の周波数が正確に 500Hz になるよう Frequency counter を用いて調整し, ヘッドホン右側は Oscillator の微調つまみを用いてブラウン管オシロのリサージュを見ながら検者が調整して同一周波数になるようにする。その間被検者にもうなりの消滅の模様を聴取させておく。ついで微調つまみを被検者自身に廻させ, リサージュをみながら, 両耳性うなりに3種あることを確認させる。検査用紙 (図2) は児童検査に適するように平易に解説し(イ)(ロ)(ハ)の3項目があげられているが

(イ) は両耳性変移 (binaural shift)

(ロ) は音量波動 (loudness fluctuation)

(ハ) はあらさ (roughness)

に相当する。なお Frequency counter による測定によると左右の周波数の差は

(イ) 1Hz 程度

(ロ) 2~3Hz

(ハ) 4Hz 以上

である。ついでブラウン管オシロのスイッチを切り聴覚のみで各周波数ごとに3種のうなり一つ一つを聴取せしめ, 聴取可能・不可能を○×で答えさせる。この際検者と被検者との間にうなりの聴取可能・不可能, うなりの性質リサージュとの関係などについての質問のやりとりが必要である。なお最終的にはうなりの消

減を被検者自身 Active tuning 法で微調つまみの操作で確認させる。この際 Frequency counter によって $4f$ を測定し記録する。なお $4f=f_1-f_2$ である。

(f_1 は L 側の周波数 f_2 は R 側の周波数) 検査は 500Hz, 750Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz の 5 種について行なう。Active tuning の操作は 2 回行ない、その平均値をとる。なお検査音は閾値上 20dB になるよう調整する。

(3) 検査対象

いずれも両耳の聴力が正常で耳疾の既往歴のないものを検査対象とした。A グループは 10~40 才の普通人を、B グループは 10~30 才の常時音楽的訓練を受けているものを対象とし、それぞれ 9 例について行なった。

(4) 測定成績

図 2 に示された質問に対する応答表を A, B 両グループ別に表 1, 表 2 に示す。すなわちこれらの表は各個人の周波数ごとの測定結果であって yes(○)no(×)といった形での答えである。また Active tuning 方式での両耳の周波数差を $4f$ の形で下欄に記した。

なお別に A, B 両グループのグループごとの $4f$ の平均値ならびに標準偏差を表 3 に示す。また各周波数ごとの両耳性うなりに対する聴取可能率(%)をうなり

の種類別に表 4 に示す。なお $4f$ は絶対値で表わした。

(5) 考察とまとめ

1) 測定の結果 500, 750Hz ではすべての両耳性うなり、すなわち両耳性変移、音量波動、あらさの 3 種共全員が聴取可能を答えている。緒言に述べたごとく 1000Hz 以下の周波数において両耳性うなりが最良に聴取されるというが (Lane 1925, Groen 1964) 本実験においても A, B グループ共良い結果が得られ両者に相違が認められなかった。

2) 1000Hz については A グループの中、大多数が両耳性変移 (binaural shift) の聴取不能を述べ、約半数が音量波動 (loudness fluctuation) の聴取不能を答えている。B グループにおいては半数が両耳性変移の聴取不能を答えている。(Groen 1964) は 800~850Hz の間で聴力の若干の低下を述べ、1100Hz を越えたとさらにさがり 1500Hz で両耳性うなりの聴取消滅をいっている。

本実験において、1000Hz における A, B 両グループの両耳性うなりに対する種類ごとの聴取応答率のあきらかな差は耳の訓練によるものと考えられる。

3) 2000Hz 以上における測定結果にこの傾向はさらに顕著に示される。周波数が高くなるにしたがって A グループの聴取可能率は急激に下がり、4000Hz においては全員聴取不能を答えている。すなわち Groen

表 1 両耳性うなりの聴取
A グループ 10~40 才の普通人 9 例の応答表ならびに $4f$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ
500 $4f=f_1-f_2$	○ ○ ○ 3.5	○ ○ ○ 1.5	○ ○ ○ 3.5	○ ○ ○ 5.3	○ ○ ○ 5.0	○ ○ ○ 1.6	○ ○ ○ 1.0	○ ○ ○ 0.3	○ ○ ○ 1.0
750 $4f=f_1-f_2$	○ ○ ○ 2.0	○ ○ ○ 1.5	○ ○ ○ 3.5	○ ○ ○ 1.0	○ ○ ○ 6.0	○ ○ ○ 2.0	○ ○ ○ 3.0	○ ○ ○ 0.3	○ ○ ○ 0.5
1000 $4f=f_1-f_2$	○ ○ ○ 1.5	× × × —	× ○ ○ 3.5	× × × —	× ○ ○ 3.5	× × ○ 4.5	× ○ ○ 2.5	× ○ ○ 2.0	○ ○ ○ 1.0
2000 $4f=f_1-f_2$	× × × —	× × × —	× × × —	× × × —	× × × —	× × ○ 13	× × × —	× ○ ○ 3.0	× ○ ○ 3.0
4000 $4f=f_1-f_2$	× × × —	× × × —	× × × —	× × × —	× × × —	× × × 27	× × × —	× × × —	× × × —

注 イ=両耳性変移 (binaural shift)
ロ=音量波動 (loudness fluctuation)
ハ=あらさ (roughness)

$f_1=L$ 側の周波数
 $f_2=R$ 側の周波数
 $4f=f_1-f_2$

表2 両耳性うなりの聴取

Bグループ 10~30 才の常時音楽的訓練を受けた人9例の応答表ならびに $4f$

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ	イ ロ ハ
500 $4f=f_1-f_2$	○ ○ ○ 0.5	○ ○ ○ 1.7	○ ○ ○ 0.9	○ ○ ○ 1.0	○ ○ ○ 2.3	○ ○ ○ 0	○ ○ ○ 0.3	○ ○ ○ 1.5	○ ○ ○ 0.3
750 $4f=f_1-f_2$	○ ○ ○ 1.0	○ ○ ○ 2.3	○ ○ ○ 2.0	○ ○ ○ 3.0	○ ○ ○ 1.0	○ ○ ○ 1.5	○ ○ ○ 1.0	○ ○ ○ 3.5	○ ○ ○ 0.8
1000 $4f=f_1-f_2$	× ○ ○ 1.0	× ○ ○ 3.0	○ ○ ○ 1.0	○ ○ ○ 4.5	○ ○ ○ 1.0	× ○ ○ 5.0	× ○ ○ 4.0	× ○ ○ 4.0	○ ○ ○ 2.0
2000 $4f=f_1-f_2$	× ○ ○ 1.0	× × × —	○ ○ ○ 2.0	○ ○ ○ 3.0	× ○ ○ 6.0	× × ○ 13.0	○ ○ ○ 2.0	○ ○ ○ 2.0	○ ○ ○ 3.0
4000 $4f=f_1-f_2$	× ○ ○ 2.0	× × × —	× × ○ —	× × ○ 8.0	× × × —	× × ○ 7.0	× ○ ○ 3.0	× × ○ 7.0	× × × —

注 イ=両耳性変移 (binaural shift)
ロ=音量波動 (loudness fluctuation)
ハ=あらさ (roughness)

$f_1=L$ 側の周波数
 $f_2=R$ 側の周波数
 $4f=f_1-f_2$

表3 A, B両グループの $4f$ の平均値ならびに標準偏差

$4f$ Hz	Aグループ		Bグループ	
	平均値	標準偏差	平均値	標準偏差
500	2.52	1.84	0.94	0.76
750	2.2	1.77	1.73	1.04
1000	2.64	1.25	3.27	1.25
2000	6.33	—	4.0	3.92
4000	—	—	5.4	—

注 $4f=f_1-f_2$ $f_1=L$ 側周波数
 $f_2=R$ 側周波数
聴覚的にうなりが消滅したときの $4f$

の説を裏書きしている。Bグループにおいて、%程度
のものが2000Hzにおける両耳性うなりの聴取可能を
答えているが、4000Hzになると個人差が大きくなり
あられてくる。すなわち4000Hzにおいて全く両耳性
うなりの可聴不能のもの、binaural shiftを除いて、
他の両耳性うなりの聴取可能なものがある。以上A、
B両グループの測定結果よりみて、1000, 2000Hzに
おける両者の差は、あきらかに音楽的訓練による聴覚
訓練をあらわすものであろう。また4000Hzの場合
は個人差が大きく、練習による結果とは考え難い。一
方うなりの消滅をActive tuning方式で聴取させた
場合の両耳の周波数差は表3に示してある。両グルー
プの

表4 応答率(%)

(うなりの聴取可能と答えたもの)

Aグループ Bグループ

	うなりの種類			うなりの種類		
	イ	ロ	ハ	イ	ロ	ハ
500	100	100	100	100	100	100
750	100	100	100	100	100	100
1000	22	67	78	44	100	100
2000	0	22	33	56	78	89
4000	0	0	0	0	22	67

注 うなり イ=両耳性変移 (binaural shift)
ロ=音量波動 (loudness fluctuation)
ハ=あらさ (roughness)

測定値平均をみると1000Hzまでは両者の間に大きな
差はみられない。またBグループについて、高い周波
数まで、 $4f$ の数値に大きなちがいが無いのは、両耳
うなりを手掛かりに聴取した場合、物理学的にいう音
のうなりについての弁別能力同様きわめて知覚が鋭い
ことを示すものである。

なお実験中、Aグループの中で雨天の際1000~2000
Hzの検査成績の向上を示し、天候・湿度の影響を示
唆するものがあったが、その説明はできなかった。

次にこれら両耳性うなりなる知覚はどうして発生す
るのであろうか。末梢内耳の周波数および音の大いさ
の分析機能は Helmholtz 以来考えられていたような

精密な完全なものではなく、聴神経インパルスが脳幹を上行する間に次第に周波数や大いさの分析が行なわれ、それらはおよそ中脳レベルで完成されるという(勝木1967)。

それならば、当然末梢内耳から伝えられる左右別個の音の情報も上オリーブ核を含む脳幹においてさらに複雑な相互作用をもつものであろうし、その間に相関・統合・積分なども行なわれて両耳性うなりを生ずるものと考えられる。しかし大脳皮質の干与も否定できず、これらの説明は今後の研究にまたねばなるまい。

文 献

Groen, J. J.: Super and Subliminal Binaural Beats. *Acta-oto-laryng.* 57; 224-230, 1964.
Lane, C. E.: Binaural Beats. *Physiol. Rev.* 26; 401-412, 1925.

Lehnhardt, E.: Die akustische Korrelation. *Arch. Ohren u. H. 178*; 493-497, 1961.

Licklider, J. C. and Webster, J. C.: On the Frequency Limit of Binaural Beats. *J. A. S. A.* 22; 468-471, 1963.

Rutschmann, J. and Rubinstein, L.: Binaural Beats and Binaural Amplitude-Modulated Tones. *J. A. S. A.* 38; 759-768, 1965.

Stewart, G. W.: Binaural Beats. *Phys. Rev.* 9; 502-508, 1917.

Tobias, J. V.: Application of a Relative Procedure to a Problem in Binaural Beat. *Perception. J. A. S. A.* 35; 1442-1447, 1963.

勝木保次：中枢神経における情報処理神経進歩, 11; 567-568, 1967.

吉井和夫：音のうなりと弁別閾値に関する実験的研究. 平安女学院短大紀要, 4; 100-106, 1973.